科学模型的完备性、局域性和理性

邓宏

(广州大学 510006)

摘要：爱因斯坦和玻尔关于完备性的争论不仅对量子力学很有意义，而且对所有科学研究都很有意义。科学理论或模型是对事实的描述，但不是事实本身。宇宙中的事实是无限的，必须一部分一部分地观察。这意味着科学观察总会具有一定的局域性和不完备性。因此，玻尔认为科学理论应能满足完备性的理性需求，这一观点更为合理。时空参照系的设计也有局域性。贝尔不等式的违反可以视为它自身有局域性的一个例证，但不能视为量子力学不完备的例证。

关键词：完备性；EPR 悖论；贝尔不等式；局域性；空间参照系；理性需求

Completeness, Locality and Rational Demand of Scientific Models

Hong Deng

(College of economics and statistics, Guangzhou University)

230 Waihuan west road, Daxuecheng, Guangzhou China

Abstract: The debate between Einstein and Bohr about the completeness/incompleteness of quantum mechanics is meaningful not only for quantum mechanics, but also for all scientific researches. Scientific theories or models are descriptions of reality, but not reality itself. Reality in the universe is infinite and it must be observed part by part. This implies that scientific observations have some locality and incompleteness in general. In this context, Bohr's viewpoint is more reasonable for he claimed scientific theories can only fulfill the rational demand of completeness. The design of reference frame of space and time also has locality. Bell inequality violation can be regarded as an evidence of the locality it has, but not an evidence of the incompleteness of quantum mechanics.

Key words: completeness; EPR paradox; Bell inequality; locality; spatial frame; rational demand of completeness

1.引言

1935 年，爱因斯坦、波多尔斯基和罗森（Einstein, Podolsky & Rosen）发表了一篇论文[1]，质疑量子力学描述物理事实的完备性。这个问题通常被称为 EPR 悖论。玻尔的回答是，事实可以“满足完备性的所有理性需求”，EPR 完备性标准在“本质上是模糊的”[2]。之后，物理事实的完备性成为物理学家和哲学家讨论的一个热点问题。按影响力排名，EPR 相关问题在《物理评论》期刊上发表的所有论文中排名前十[3]。

如果一个理论是不完备的，那么一定有某些因素被忽视了，或者说有一些“隐变量”尚待发现。于是出现了许多关于隐变量是否存在的研究[4][5][6]。爱因斯坦也尝试了寻找隐藏变量的方法。但后来他认为通过发现隐变量来解决量子力学的

完备性是一条不太可能的途径[3][7]。到目前为止也没有人发现这样的变量。另一方面，贝尔不等式（Bell inequality）引起了广泛关注。人们普遍认为，一个完备的理论应该满足贝尔不等式。这意味着不等式可以作为一个评价完备性的工具。从 20 世纪 70 年代开始，许多实验证实了事实预测违反了相关的贝尔不等式[3][8][9][10][11]。然而，物理学家不能得出量子力学不完备的结论。为什么？因为量子力学在现代科学技术的应用中取得了很大成就。即使认为量子力学不完备，科学家们也不得不承认“EPR 完备性标准不是科学模型的禁止定理”[12]，或者量子力学可以“在不表述完备的物理系统”中应用[13]。

这使得 EPR 悖论显得更有意思了。如果量子力学是不完备的，为什么它能很好地应用？如果一个不完备的理论能够很好地应用，我们要求科学理论应当具有完备性的意义何在？或许是为了回避关于完备性的争论，贝尔不等式违反现象常常被解释为“非局域性”。一般认为，经典力学具有局域性，而量子力学具有非局域性[14][15][16]。但这立刻产生了另一个问题：为什么经典力学具有局域性，而量子力学具有非局域性？如果局域性和非局域性都是事实，将两者加以区分的意义何在？

事实上，玻尔在回答 EPR 问题时提出了另一个完备性的标准，即满足完备性的理性需求。理性需求来自于人类。这意味着科学理论的完备性在某种程度上与人性有关。遗憾的是，在 EPR 悖论的讨论中，玻尔的标准并没有得到太多的关注。但这确实是认识科学模型与事实之间关系的一条重要线索。

本文将解释为什么玻尔的标准是有科学意义的，因为科学研究是由人类完成并服务于人类的。宇宙中的事实是无限的，科学家必须逐一观察和描述它们。有限的观察范围意味着对事实表述的局域性和不完备性。因此，科学理论只能相对完备，这就是对事实的理性需求的真正含义。

2. 事实的抽象和表述

科学是对事实的研究。研究事实需要把事实表述出来。因此，区分事实和对事实的描述非常重要。所有用来表述事实的工具或媒介都可以称为模型，包括字母、单词、语言、符号、图形和任何其他工具。这是一种广义的模型概念，包括通常所称的模型以及构建这些模型所使用的元素。

模型是物理事实的抽象。由于宇宙是无限的，事实只能被一部分一部分地观察和描述。为了使模型完备，我们应该尽可能多地观察事实。另一方面，为了使科学研究工作有效率，模型应该尽可能简单。显然，人们需要在完备和效率之间进行权衡。如爱因斯坦所言[1]：科学就是把事物表述得“尽可能简单，但不能过于简单”（not simpler）。这一观点可以被视为科学的标准。“尽可能简单”源于人们的理性需求。“过于简单”意味着不完备。在这个意义上，爱因斯坦和玻尔的认识是相同的。

让我们来看一个例子：

（E1） 嫦娥 4 号于 2019 年 1 月 3 日 10 点 26 分（北京时间）在登陆月球。

[1] https://www.oxfordreference.com/display/10.1093/acref/9780191826719.001.0001/q-oro-ed4-00003988#:~

示例（E1）是关于登月事件的相当完备的描述。它似乎在描述了一个事实（或事件）。不过，为了使描述比较完备，它实际上涉及到许多事实。这就是一些学者所称的“相互存在”[16]，即所有事实都是共同存在的，需要相互表述。登陆器、登陆的位置和时间都是事实。时间又是许多事实的组成部分。如所周知，“年”参照了地球围绕太阳的公转周期；“日”参照了地球的自转周期；“小时”参照了地球对太阳的朝向；“秒”参照了铯 133 的振动周期；时区则是指观察者在地球上的位置。所有这些事实都起着相互参照的作用。这些参照物使得物理事实的表述相当完备，但也不是绝对完备。比如，注明登陆器在月球上的纬度和经度，可以使 E1 的表述更完备一些。

3.观察的局域性

从示例（E1）可以看到的，我们使用了以月球为中心的空间参照系来表述登陆器的位置。如所周知，当登陆器返回地球时（或在登陆器发射之前），我们会使用地球参照系来表述其位置。如图 1 所示，我们要用两个参照系来表述整个登陆任务过程。我们为什么不只用一个地球参照系或只用一个月球参照系来表述整个登陆过程呢？这是因为人们的观察范围有限，或者说我们的观察具有局域性！当登陆器靠近月球时，它的位置无法在地球参照系中准确表述。或者说地球参照系无法满足我们对事实表述完备性的需求。反之亦然。科学不是数学，在数学意义上，一个坐标系的使用范围可以任意扩展。

登陆器或宇宙飞船可以靠近地球、靠近月球或靠近太阳。这意味着宇宙中的事实没有空间限制，或没有局域性限制。但科学模型的设计具有局域性。任何参照系都只能在有限的空间范围内有效或相对完备，无论是球面坐标系还是直角坐标系。所谓“相对”就是相对于人们的理性需求。因为任何一个空间参照系只是某些事实的模型，而不是所有事实的模型。地球参照系是地球附近空间的抽象（模型）。月球参照系是月球附近空间的抽象（模型）。所谓“附近”当然也是相对的。要表述月球的位置，可以认为它在地球附近。要表述火星的位置，可以认为它在太阳附近。要表述火车的运动，可以被认为它在铁轨或地面附近。显然，参照系的设计和选择取决于科学研究的理性需求。

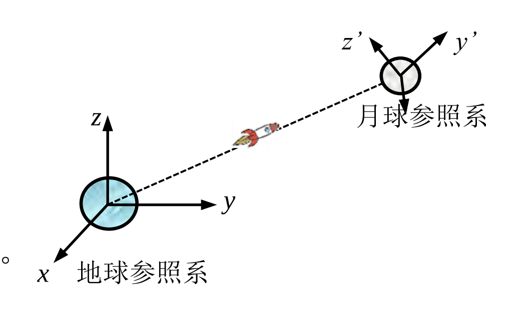


图 1　两个相对独立使用的参照系

由此我们还可以看到，经典力学通常是使用单一的参照系来表述事实。比如在月球参照系或者在地球参照系中表述事实，而不是同时用两个或多参照系来表述事实，像图 1 那样。在量子力学中，情况可能有所不同。以双缝实验为例。如图 2 所示，光子的整个行进过程是在两个空间参照系中尽显表述：一个在狭缝的左侧，另一个在狭缝的右侧。图 2 中的两个空间和图 1 中的地球和月球两个空间相似。不同之处在于，图 1 中的整个空间可以分为两个相对独立的局域空间，而图 2 中的两个空间不适合分开。在实践中，我们会直接将所有实验仪器作为参照

物或参照系，而不是把某一设备的参照系延伸到整个实验空间。

如果一个空间参照系具有局域性，那么在这个参照系内推导出的理论也可能具有局域性。贝尔不等式是在局域空间参照系中推导出来的。它在一个多参照物体系中可能不适用或失效。同样道理，许多物理理论也都有局域性。它们可以描述很多事实，但适用的空间范围是有限的。由于任何一个参照系只是对特定空间的模拟，在表述复杂事物时，我们可能会像示例（E1）和图 2 中那样使用多个参照系。

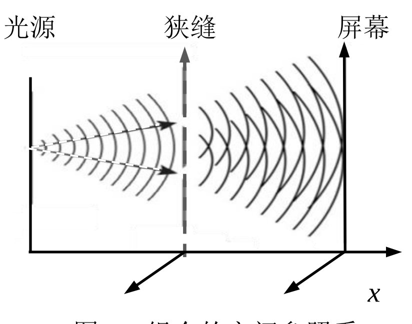


图 2　组合的空间参照系

4.事实的空间

在回应 EPR 问题时，玻尔认为“有必要最终放弃因果关系的经典理想，并彻底改变我们对物理事实问题的态度”[2]。具体而言，到底应该放弃什么，应该改变什么呢？基于前面的分析，时空观的改变可能是最重要的。

科学模型中的空间和时间是对某些事实的抽象，而不是物理事实本身。它们旨在理性地表述事实。用玻尔的话说，“测量一个粒子的位置不过是意味着在它的行为和某个刚性固定在支撑物上的仪器之间建立相关性，该支撑物定义了空间参照系”[2]。简言之，是实验仪器或实验装置“定义了空间参照系”。按照邓宏[16]的解释，空间存在于事物或事实之间。离开了事实，空间参照系就不可能构建。在图 2 中，空间（或空间参照系）是由狭缝片、屏幕和光源定义的。在图 1 中，空间是由月球或由地球定义的。在示例（E1）中，人们使用了更多的空间参照系，包括月球参照系（用来定位登陆器）、地球参照系（用来定义时区）、日—地双空间参照系（用来定义年、月和日）和铯原子参照系（用来定义秒）。

简而言之，空间或空间参照系是由科学家要研究的那些事实决定的。在现实世界，空间存在于物理事实之中。而在科学模型中，事实似乎是存在于空间之中。这是因为空间模型通常代表观察背景，因而设计得比较大；而事实模型通常代表观察对象，因而设计得比较小。空间科学家们喜欢使用三维（3D）空间参照系，不是因为宇宙的空间是三维的，而是因为三维空间模型可以很好地满足人们对事实进行完整表述的理性需求。类似地，我们在（E1）中还可以看到，时间也不是一维的。科学家们喜欢使用一维时间参照系，因为它使用方便，并且可以满足人们对完备性的理性需求。基于以上认识，我们也可以理解海森堡测不准原理背后的根本原因：宇宙中有无限多的空间，用来表述微观粒子的运动的模型不可能做到绝对完备。

5.结论

如玻尔所言，我们有必要彻底改变对物理事实问题的态度。科学模型是对物理事实的描述，但不是物理事实本身。科学模型中的时空参照系也是某些事实的模型，但不是事实本身。如果对事实的表述非常接近事实，我们通常会称之为事实。这种习惯也有可能会使我们把物理事实和模型事实混为一谈。

科学是对事实的研究。宇宙中的事实是无限的。任何模型都只能描述其中的一小部分。这是科学模型或科学理论总是具有局域性或不完备性的一个根本原因。局域性观察或简化抽象可以使科学模型的设计比较准确和高效。然而，局域性观察往往与不完备相伴。科学家应该在效率和完备性之间取得平衡。这意味着科学家门对科学理论完备性的需求是理性的。因为没有任何模型或理论是绝对完备的。

空间和时间是由物理事实决定的。三维空间和一维时间参照系是科学家们广泛使用的一种非常成功的模型。但这并不意味着真实的宇宙是三维的，绝对的时间是一维的。无论是在经典力学还是量子力学中，物理事实通常都不是局域的。贝尔不等式是在三维空间参照系中推导出来的。贝尔不等式违反可以认为是空间参照系的局域性或不完备性的一个例证，但不能任务是量子力学不完备的一个例证。

科学研究为人类服务，由人类进行。毫无疑问，理性需求随着科学的发展而变化。我们了解的事实越多，科学模型就越有可能变得完备。

参考文献

[1]Einstein, A., Podolsky, B. and Rosen, N., "*Can quantum mechanical description of physical reality be considered complete?*"[J], Physical Review 47: 777–780, 1935

[2]Bohr, N., "*Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete*?"[J], Physical Review 48:696–702, 1935

[3]Stanford Encyclopedia of Philosophy. *The Einstein-Podolsky-Rosen Argument in Quantum Theory*[EB/OL]. https://plato.stanford.edu/entries/qt-epr/ (2017)

[4]Stanford Encyclopedia of Phi. *Kochen-Specker Theorem*. [EB/OL] https://plato.stanford.edu/entries/kochen-specker/ 2022

[5]Nicholas Harrigan, Robert W. Spekkens. *Einstein, incompleteness, and the epistemic view of quantum states*.[DOI] https://arxiv.org/abs/0706.2661#:~:text

[6]Kochen, S., and E. Specker, *The Problem of Hidden Variables in Quantum Mechanics*[J], Journal of Mathematics and Mechanics, 17, 1967, 59-87.

[7]Gilles Brassard, Andre Allan Methot. *Can quantum-mechanical description of physical reality be considered incomplete?* [EB/OL] arXive: ph/0701001v1 30 Dec 2006

[8]Stanford Encyclopedia of Philosophy. *Bohmian Mechanics* [EB/OL]. https://plato.stanford.edu/ entries/ qm-bohm/ 2021

[9]Stanford Encyclopedia . Bell's Theorem. [EB/OL] https://plato.stanford.edu/entries/bell-theorem/

[10]Liu, YJ., Zheng, L., Shi, Y. et al. *Dynamics of the Geometric Measure of Quantum Discord and Bell Non-Locality in a Ring Cavity Induced by Spontaneous Emission*[J]. Int J Theor Phys 58, 824–835 (2019). https://doi.org/10.1007/s10773-018-3978-x

[11]Zhi-Li Zhou, Hao Yuan & Lian-Fu Wei. *Entanglement, Quantum Discord, and Non-locality in Bell-Diagonal States* [J]. International Journal of Theoretical Physics. Volume 52, pages 420–428, (2013)

[12]Internet Encyclopedia of philosophy. *The Einstein-Podolsky-Rosen Argument and the Bell*

Inequalities[EB/OL]. https://iep.utm.edu/wp-content/media/epr-bell-pdf-2018.pdf. Also in László E. Szabó. *The Einstein-Podolsky-Rosen Argument and the Bell Inequalities*.

[13]Bell, J. S. *Speakable and unspeakable in quantum mechanics*]M], Cambridge University Press, Cambridge. 1987: 90

[14]Jin, Zhi-Xiang Li-Jost Xianqing , Fei Shao-Ming, and Qiao Cong-Feng. *Quantum coherence bounds the distributed discords.*[DOI] arXiv: quant-ph 2203.12699v1

[15]Xia Wei, Hou Jin-Xing, Wang Xiao-Hui. *The sudden death and sudden birth of quantum discord.* Scientific Reports 8, 5325 (2018). .[DOI] https://doi.org/10.1038/s41598-018-23639-1

[16]Dietrich Dehlinger and M. W. Mitchell. *Entangled photons, nonlocality, and Bell inequalities in the undergraduate laboratory.* [DOI] arXiv:quant-ph/0205171, 2022

[17]邓宏. 《元科学哲学》[M]. 北京：研究出版社，2022: 139-175